



# CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y DE DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS EN EL VOLUMEN SÍSMICO BARRANQUILLA 3D

---

PROYECTO DE GRADO | GEOLOGÍA

PRESENTADO POR:

**EDGAR NÚÑEZ**

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y DE DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS  
EN EL VOLUMEN SÍSMICO BARRANQUILLA 3D**

Autor:

Edgar Alberto Núñez Causil

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

*Geólogo*

Director:

MSc. Carolina Martínez Mendoza

Universidad del Norte

Universidad del Norte

Departamento de Física y Geociencias

Barranquilla 2020

*A Dios, mis padres y hermanos, quienes han  
estado conmigo durante toda mi carrera  
profesional*

## A G R A D E C I M I E N T O S

A Carolina Martínez, por haber aceptado ser parte de este proyecto y creer en mí. Por sus consejos, confianza y apoyo durante todo este tiempo.

A Ecopetrol S.A., especialmente a Daniel Bello, por darme el permiso a los datos utilizados para realizar este proyecto.

A Oscar Álvarez, por los consejos y retroalimentaciones.

A Jaime Júdex, por apoyarme y mantenerse al tanto del proyecto.

## RESUMEN

La identificación de geoamenazas en zonas de aguas profundas es de suma importancia para cualquier proyecto de la industria de hidrocarburos y planes de ordenamiento territorial costero. Para identificar las posibles amenazas en estas zonas se deben tener en cuenta factores geomorfológicos y geológicos que puedan desencadenar eventos potencialmente dañinos. El objetivo de este trabajo es caracterizar la geomorfología del fondo marino y depósitos sedimentarios del subfondo en el volumen sísmico Barranquilla 3D, con el fin de obtener la información base para la generación de un mapa de geoamenazas. El volumen sísmico Barranquilla 3D se localiza en la cuenca Sinú Offshore, una cuenca de tipo prisma de acreción con registros de aportes del proto-Magdalena y actualmente influenciada por el abanico del Magdalena. En este trabajo, la información básica para identificar geoamenazas se obtuvo mediante el análisis de modelos de elevación digital del fondo marino y líneas sísmicas 3D, donde se marcaron horizontes correspondientes a depósitos sedimentarios, rasgos geológicos, fallas, superficies erosivas y pliegues. La geomorfología del área está dominada por la presencia de una serie de sistemas de canal-dique con formas sinuosas e interrupciones abruptas o destrucción parcial de los canales por depósitos de deslizamientos. Generalmente se encuentran pendientes entre los  $0^{\circ}$  y  $39,79^{\circ}$ ; además, es común la presencia de fallas normales con profundidades inferiores a los -550 m y capas plegadas producto de la intrusión de al menos 5 diapiros de lodos con alturas entre 370 m y 1565 m. Las características geomorfológicas y geológicas identificadas permitieron estimar zonas propensas a deslizamientos, resaltando 4 áreas principales con niveles de riesgo medios y altos asociados a fallas normales y pendientes de moderadas a altas ( $16^{\circ}$ - $39^{\circ}$ ). Igualmente se estima que la mayoría de las zonas dentro del volumen sísmico puede verse afectada por eventos de deslizamientos, pero en magnitudes mucho más bajas.

## A B S T R A C T

Identifying geohazards in deep water areas is important for the hydrocarbon industry projects and coastal territorial planning. To identify possible threats in these areas, geomorphological and geological factors that could trigger potentially damaging events must be considered. The objective of this work is to characterize the geomorphology of the seafloor and sedimentary deposits of subbottom in Barranquilla 3D seismic volume, to obtain information for generating a geohazard map. The Barranquilla 3D seismic volume is located in the Sinú Offshore basin, a prism-type accretion basin with input records from the proto-Magdalena and currently influenced by the Magdalena River fan. In this work, the data to identify geohazards came from digital bathymetric models and 3D seismic, where horizons corresponding to sedimentary deposits and geological features, faults, sharp boundaries, and folds were marked. The geomorphology of the area is dominated by the presence of channel-levee systems exhibiting sinuous shapes and abrupt interruptions or partial destruction by landslide deposits. In the study area, the slope angles range between  $0^{\circ}$  and  $39,79^{\circ}$ ; also, it is common the presence of normal faults with lengths up to -550 m and folded layers by the intrusion of 5 mud diapirs with heights between 370 m and 1565 m. Geomorphological and geological features allowed estimating landslide-prone areas, highlighting 4 main zones with medium and high-risk levels associated with normal faults and moderate to high slopes ( $16^{\circ}$  -  $39^{\circ}$ ). Likewise, it is estimated that most areas within the seismic volume could be affected by landslide events but at much lower magnitudes.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| 1. Introducción .....                                       | 7  |
| 2. Planteamiento del problema .....                         | 8  |
| 3. Objetivos.....   | 9  |
| 3.1 Objetivo general .....                                  | 9  |
| 3.2 Objetivos específicos.....                              | 9  |
| 4. Marco geológico .....                                    | 10 |
| 4.1 Geología regional .....                                 | 10 |
| 4.2. Geología de la cuenca Sinú Offshore .....              | 11 |
| 5. Metodología.....   | 14 |
| 5.1 Descripción de datos.....                               | 14 |
| 5.2 Revisión bibliográfica .....                            | 14 |
| 5.3 Procesamiento de la información .....                   | 15 |
| 5.4 Análisis de datos.....                                  | 17 |
| 6. Resultados.....  | 19 |
| 6.1. Batimetría y Modelo Digital de Elevación.....          | 19 |
| 6.2. Superficie de la base del Cuaternario .....            | 24 |
| 6.3. Facies sísmicas .....                                  | 26 |
| 6.4. Mapa de riesgo por deslizamiento (multicriterio) ..... | 31 |
| 7. Discusión .....  | 34 |
| 7.1 Geomorfología.....                                      | 34 |
| 7.2 Geoformas, fallas y depósitos del subfondo.....         | 35 |
| 7.3 Geoamenazas .....                                       | 36 |
| 8. Conclusiones y recomendaciones .....                     | 38 |
| 8.1 Conclusiones .....                                      | 38 |
| 8.2 Recomendaciones .....                                   | 39 |
| Referencias .....   | 41 |

## TABLAS Y FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 1.</b> Ubicación del volumen sísmico Barranquilla 3D y pseudopozo Well-1X.....  | 10  |
| <b>Figura 2.</b> Zonas de deformación en el Caribe Colombiano. ....   | 113 |
| <b>Figura 3.</b> Diagrama cronoestratigráfico de la cuenca Sinú Offshore y cuenca Colombia. ....                                | 135 |
| <b>Figura 4.</b> Modelo de velocidades generados en la grilla 3D.. ....   | 219 |
| <b>Figura 5.</b> A. Mapa batimétrico del fondo marino, pendientes y direcciones de pendientes .....                             | 213 |
| <b>Figura 6.</b> Modelo digital de elevación del fondo marino y características geomorfológicas .....                           | 235 |
| <b>Figura 7.</b> Línea sísmica y Modelo digital de elevación a partir de mapa paleobatimétrico de la base del Cuaternario. .... | 257 |
| <b>Figura 8.</b> Facies sísmica 1 y diapiros de lodo .....  | 279 |
| <b>Figura 9.</b> Facies sísmica 2, facies sísmica 3 y depósitos de deslizamiento en vista 2D. ....                              | 31  |
| <b>Figura 10.</b> Representación de fallas normales en la zona norte del volumen sísmico. ....                                  | 313 |
| <b>Figura 11.</b> Mapa de susceptibilidad por deslizamiento. ....   | 335 |



## 1. Introducción

Las actividades exploratorias de hidrocarburos en Colombia han brindado información para el entendimiento de la geología del país y sus cuencas. Una de estas cuencas conocida como Sinú Offshore ha sido una de las más importantes para la industria y para la ciencia (Duque-Caro, 1984; Breen, 1989; Flinch et al, 2003; Romero, 2009). Esta cuenca de tipo prisma de acreción se encuentra ubicada a lo largo del margen Caribe de Colombia y al borde noroccidental de la placa Suramericana (Kellogg et al., 2005).

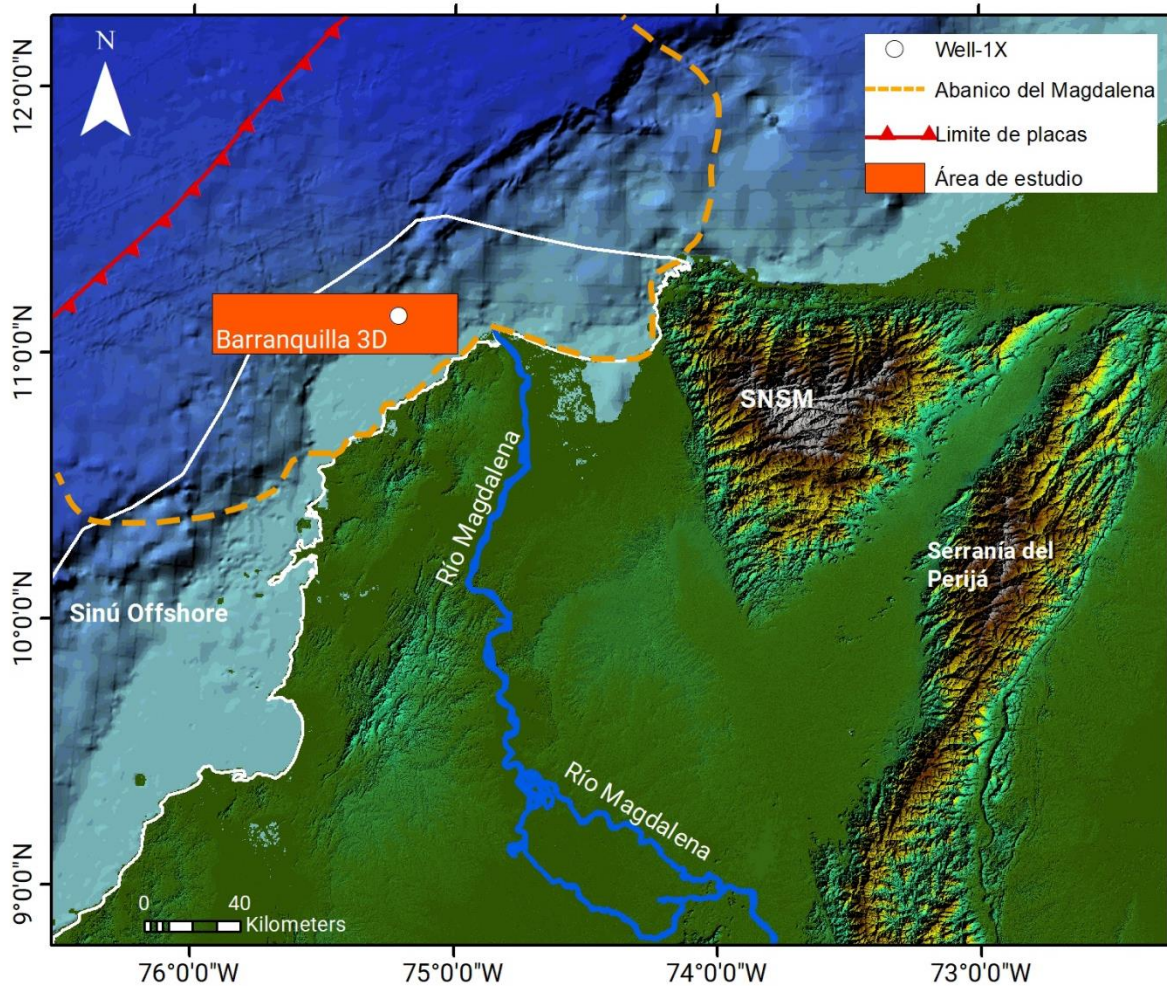
Durante el Mioceno Superior el área de estudio fue rellenada con sedimentos provenientes de sistemas como el proto-Magdalena y Plato (Flinch et al., 2003), mientras que los depósitos de los sedimentos actuales en la zona están asociados con material sedimentario del abanico del Magdalena (Cadena y Slat, 2013). La estructura en forma de prisma que conserva actualmente esta cuenca se interpreta como producto de compresión NW-SE asociado a eventos de subducción tipo B, con estructuras extensionales, compresivas y gravitacionales (Flinch et al., 2003).

Dentro de esta cuenca se encuentran distintas divisiones espaciales en las cuales se ha realizado sísmica de reflexión en proyectos de exploración. Una de estas divisiones se conoce como volumen sísmico Barranquilla 3D, el cual cuenta con un área de 2.456 km<sup>2</sup> y se encuentra ubicado a 14,45 km al oeste de la desembocadura del río Magdalena (Figura 1).

Debido a la locación, altas tasas de sedimentación y pendientes inestables, es posible encontrar geoformas y depósitos sedimentarios que pueden identificarse mediante las líneas sísmicas, debido a que presentan reflectores con amplitudes y geometrías diferentes.

El propósito del trabajo es aportar modelos de elevación digital donde puedan observarse geoformas del fondo y subfondo, al igual que depósitos sedimentarios y pendientes en el

volumen sísmico Barranquilla 3D. Además, reconocer rasgos geológicos en las líneas sísmicas como control estructural o contactos erosivos, con el fin de dar una aproximación a geoamenazas.



**Figura 1.** Ubicación del volumen sísmico Barranquilla 3D y pseudopozo Well-1X. Zona de influencia del abanico del Magdalena se encuentra marcada con líneas amarillas punteadas y que interceptan en un área con la cuenca Sinú Offshore. Se representa la zona de subducción con una línea roja y triángulos del lado de la placa Suramericana.

## 2. Planteamiento del problema

Los estudios de geomorfología marina se han intensificado en los últimos tiempos debido a la expansión de actividades humanas e industriales costa afuera. Estos estudios ofrecen la posibilidad de conocer las condiciones meteo-marinas, oceanográficas, geomorfológicas y actividad tectónica de estas zonas. El Caribe colombiano se ha convertido en una zona de interés económico para el desarrollo de infraestructura marina, además de albergar amplias poblaciones que residen en sus costas. Se caracteriza por ser una zona dinámica con alta influencia de

sedimentos provenientes del río Magdalena, depósitos de hidratos de gas, presencia de diapirismo de lodo, entre otros factores que la hacen propensa a la ocurrencia de geoamenazas marinas tales como deslizamientos submarinos.

La geología marina es de suma importancia para conocer procesos geológicos en aguas profundas, sin embargo, los estudios relacionados con esta son aún incipientes en el país. El siguiente proyecto busca aportar conocimiento sobre un área limitada de la cuenca Sinú Offshore, que además de ser atractiva en el contexto científico, tiene un rol importante en proyectos de exploración de hidrocarburos en el Caribe, permitiendo que a través de la identificación de geoformas marinas e interpretación de áreas propensas a geoamenazas se puedan realizar mejores diseños de infraestructuras en la industria de los hidrocarburos.

Asimismo, permite aportar información importante para planes de ordenamiento territorial costeros, ya que en estos se debería incluir la identificación de geoamenazas o al menos reconocer la proximidad de asentamientos a zonas con un alto potencial de riesgo. De esta manera, se mejoraría la organización o reorganización de un territorio municipal o distrital que pueda estar en riesgo por alguna geoamenaza marina.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Describir la geomorfología y algunos depósitos sedimentarios del fondo y subfondo en el volumen sísmico Barranquilla 3D con el fin de reconocer factores que puedan ser causales de geoamenazas.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Diferenciar y describir las geoformas y depósitos sedimentarios cuaternarios presentes en el fondo y subfondo marino a partir del análisis de información sísmica 3D.

-Generar modelos de elevación digital y mapas de pendientes para caracterizar rasgos geomorfológicos.

-Realizar un análisis de las potenciales geoamenazas dentro de la zona con base en las geoformas, depósitos sedimentarios, actividad tectónica y otros procesos geológicos que puedan ser causales de eventos potencialmente peligrosos.

## **4. Marco geológico**

### **4.1 Geología regional**

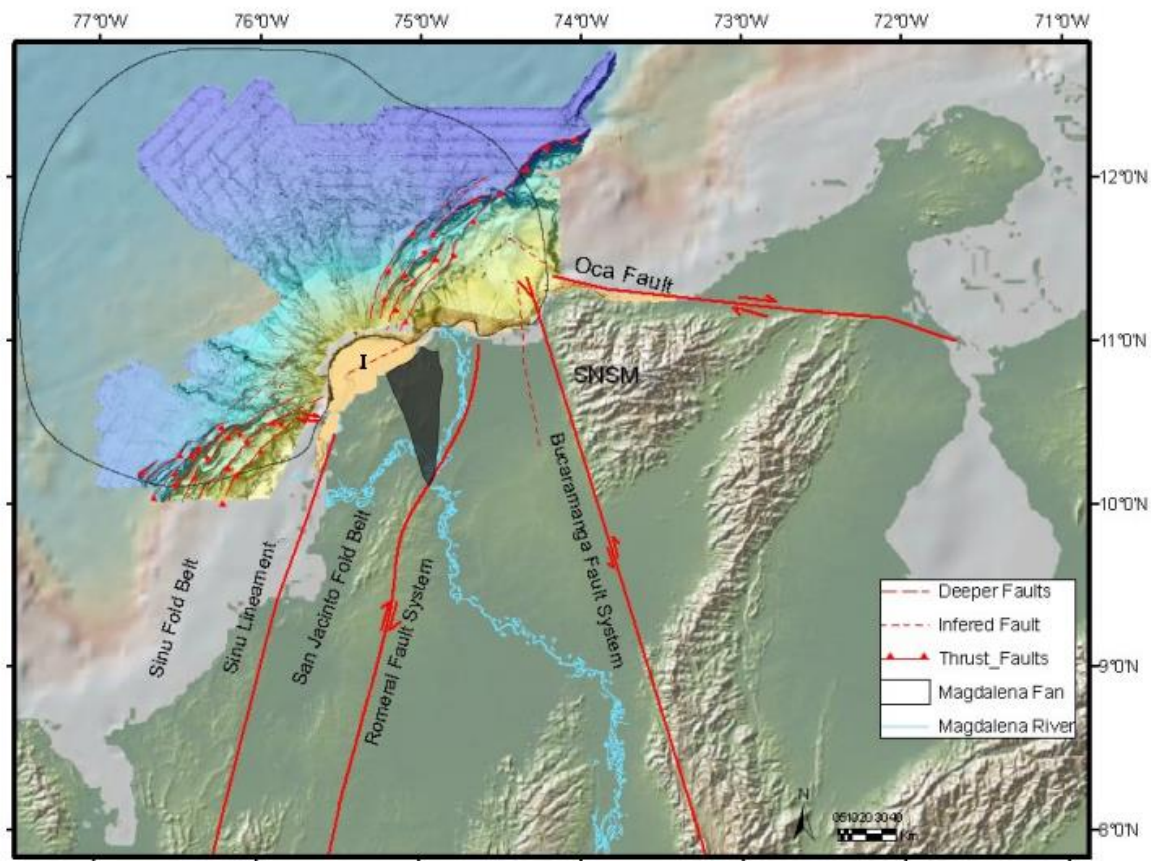
El Caribe colombiano presenta rasgos geológicos asociados a una zona tectónicamente activa, debido a la presencia de un límite de placas convergente donde la placa Caribe subduce oblicuamente por debajo de la placa Suramericana (Montes et al., 2019; Mantilla-Pimiento et al., 2009). La zona de convergencia entre estas placas de orígenes diferentes, oceánica y continental, se asocia a un prisma de acreción con sedimentos que han sido desplazados desde el Cenozoico. Este complejo estructural que se extiende a lo largo del Mar Caribe es asociado a la actividad sísmica presente hoy en día.

En el Caribe colombiano se identifican zonas en el Valle Inferior del Magdalena divididas por el sistema de fallas Romeral, con una gran evidencia de procesos tectónicos. Al oeste de este sistema se encuentran dos zonas conocida como los cinturones plegados Sinú-San Jacinto. Estos cinturones cuentan con deformaciones por procesos estructurales con sedimentos dispuestos en diferentes geometrías y con espesores variantes, algunos incluso mayores a los 12 km (Kellogg et al. 2005). Según Duque-Caro (1990) los sedimentos que se encuentran en el cinturón del Sinú son de rocas pelágicas del Cretácico tardío, secuencias turbidíticas del terciario y sedimentos lacustres y fluviales del Cuaternario, mientras que el cinturón de San Jacinto incluye rocas como lutitas del Oligoceno-Mioceno y depósitos de turbiditas del Mioceno y Plioceno relacionada con facies carbonatadas del Cuaternario (Alfaro y Holz, 2014; Duque-Caro, 1990).

## 4.2. Geología de la cuenca Sinú Offshore

La cuenca Sinú Offshore se encuentra localizada en un margen activo que evidencia rasgos de deformación y eventos de depositación productos de un cambio en la morfología del fondo marino, esto, gracias a la subducción de la placa Caribe bajo la Suramericana. La estructura del complejo acrecional de la zona Offshore del Sinú está dominada por 2 zonas de deformación con sistemas de fallas de cabalgamiento y una zona intermedia sin presencia de este tipo de fallas (Romero-Otero, 2009; Romero-Otero, 2015) (Figura 2).

La Cuenca Sinú Offshore estuvo dominada desde el Plioceno por sedimentación de tipo fluvial (Alfaro y Holz, 2014) asociada a un antiguo lóbulo deltaico del río Magdalena (Figura 2), mientras que actualmente se ve influenciada por el abanico del Magdalena.



**Figura 2.** Zonas de deformación y geomorfología del fondo marino en una zona offshore del Caribe Colombiano. Predominancia de 2 áreas con fallas de cabalgamiento, ubicadas a los lados de un antiguo lóbulo deltaico (I). La zona sombreada corresponde al delta del proto-Magdalena en el Plioceno. Modificado de Romero, 2009.

El área de influencia del abanico del Magdalena que se encuentra dentro de la cuenca Sinú Offshore exhibe una batimetría con complejos de canales, considerados registros morfológicos de la evolución y migración del delta del río Magdalena. El proto-Magdalena es una evidencia del cambio espacial de la desembocadura del río, donde la antigua carga de sedimentos provenientes de este y la actividad tectónica produjo un estado crítico en la zona que llevó a colapsar estructuras preexistentes en el área (Romero-Otero, 2009), pero que a su vez permitió la aparición de pendientes y canales submarinos que en un futuro dominarían el fondo marino.

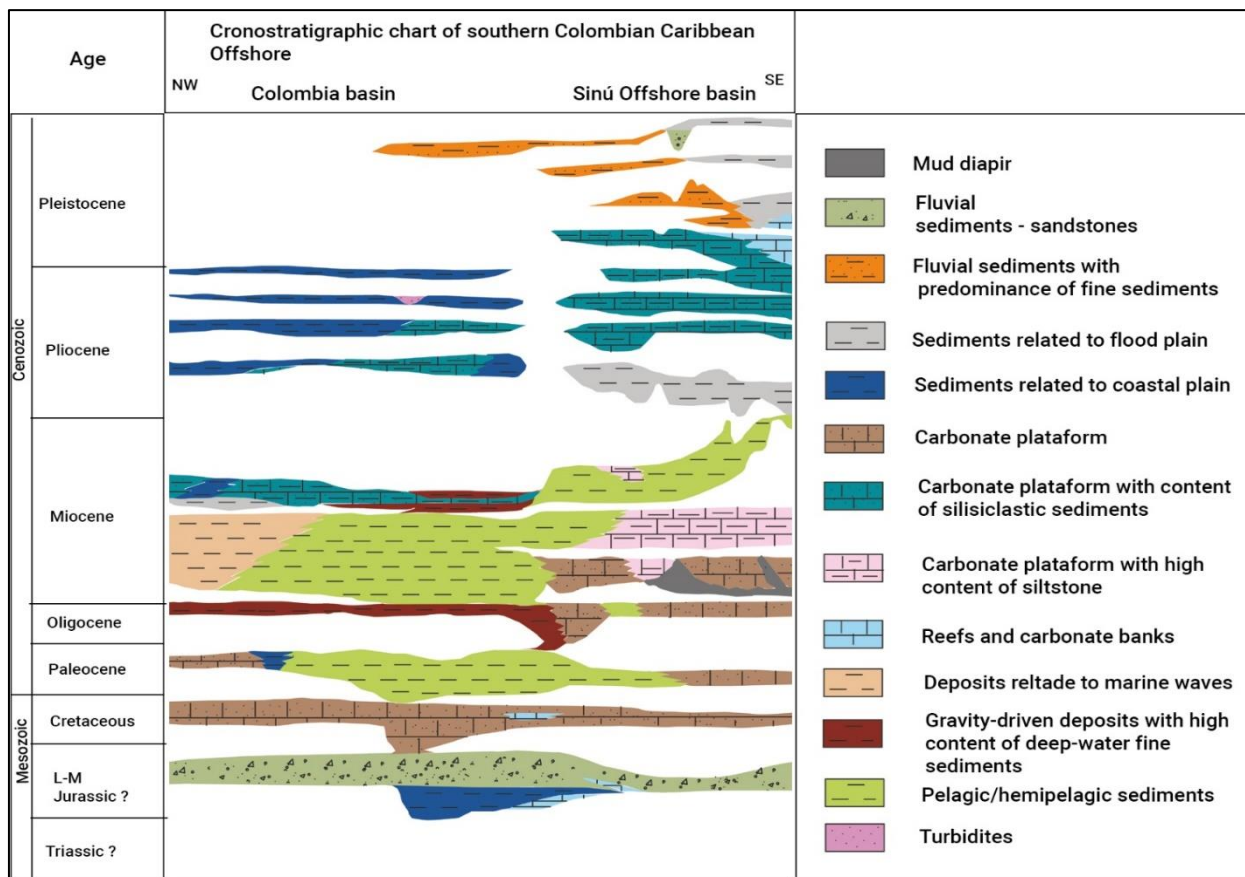
La cuenca Sinú Offshore no presenta las mismas geoformas a lo largo de toda su extensión, ya que la influencia de la desembocadura del río Magdalena y el control estructural no es igual en toda el área de la cuenca, por lo que al sureste es poco común la presencia de canales sinuosos (Idárraga-García et al., 2019), pero si la presencia de anticlinales y diapiros de lodo. Estos diapiros pueden expresarse como volcanes tanto en el continente (volcán del Totumo, Galerazamba) como en la zona offshore, y son producto de la sobrepresión de lodos que se encuentran subyacentes a otras capas de sedimentos.

Las rocas más antiguas de la cuenca corresponden al Jurásico Inferior (Figura 3), dominada por carbonatos y sedimentos de planicies de inundación de grano fino (Alfaro and Holz, 2014) y subyacentes a facies de bancos de arrecifes y areniscas carbonatadas asociadas a plataforma con edades del Cretácico (Flinch, 2003). Durante el Paleoceno la cuenca era controlada por un ambiente marino profundo, con cierta influencia de carbonatos, facies asociadas a un evento de extensión y controladas por un sistema de fallas normales. Alfaro y Holz (2014) afirman que desde el Eoceno al Oligoceno la cuenca se caracterizó por sedimentación sobre zonas con alta variación en las pendientes, con depósitos asociados a deslizamientos y cambios laterales que van desde facies hemipelágicas a pelágicas. Durante el Mioceno-Eoceno se presentan depósitos sedimentarios relacionados a los paleodeltas del río Sinú



y río Magdalena, con facies de rocas clásticas depositadas en ambientes marino-marginales o de plataforma interna y depósitos clásticos marinos originados por corrientes de turbidez baja (Porras y Ortiz, 2009; Restrepo y Kjerfve, 2000; Vinnels et al., 2010).

La sedimentación en una parte de la cuenca durante el Plioceno estuvo dominada por rocas carbonatadas y siliciclásticas de grano fino asociadas a planicies de inundación, pero con algunas otras zonas controladas por depósitos de tipo fluvial. Por último, las facies del Pleistoceno hasta la actualidad son de ambientes fluviales con influencia de canales, planicies de inundación y depósitos sedimentarios asociados a cañones con pendientes de alto grado (Alfaro et al, 2013; Alfaro y Holz, 2014).



**Figura 3.** Diagrama cronoestratigráfico de la cuenca Sinú Offshore y cuenca Colombia. Depósitos sedimentarios presentes en la cuenca Sinú Offshore, posiblemente desde el Jurásico hasta el Pleistoceno. Modificado de Alfaro and Holz (2013).

## **5. Metodología**

### **5.1 Descripción de datos**

El conjunto de datos se compone de líneas sísmicas 3D, datos del pseudopozo Well-1X e información bibliográfica de la zona de estudio. Las líneas sísmicas fueron otorgadas por Ecopetrol y resultaron de un proyecto de exploración offshore durante el 2009. Estas presentan un bin size de 25 m x 12,5 m, una resolución vertical de 4 ms y una escala vertical en dos tiempos de viaje (TWT). El cubo sísmico se divide en líneas sísmicas clasificadas en *InLine* (IL) y *CrossLine* (XL) con sentido W-E y N-S respectivamente. Estas líneas sísmicas cuentan con una calidad media, ya que algunas presentan reflectores muy marcados y visibles, mientras que algunas otras líneas sísmicas cuentan con interrupciones o con falta de reflectores, producto de errores a la hora de la adquisición de estas.

El pseudopozo Well-1X (localización Figura 1) contiene datos de un pozo cercano al volumen sísmico. Este pozo ubicado dentro de la cuenca Sinú Offshore presenta datos de profundidad en metros, alcanzando los 10.315 m perforados. Cuenta además con un registro de datos de velocidades de onda P respecto a la profundidad.

### **5.2 Revisión bibliográfica**

Antes de realizar algún tipo de interpretación en las líneas sísmicas o en cualquier mapa generado se realizó una revisión bibliográfica para conocer aspectos geomorfológicos y geológico estudiados anteriormente. Los primeros datos o trabajos encontrados fueron sobre la geología regional: sistemas de fallas en el Caribe colombiano, litología, cantidad de cuencas, actividad tectónica y líneas sísmicas interpretadas. Luego, la revisión sobre la geología marina y los avances que se llevan hasta la actualidad permitieron una mejor contextualización sobre el área en estudio, términos utilizados y eventos registrados.



### 5.3 Procesamiento de la información

El primer paso consiste en el control de calidad de las líneas sísmicas 3D mediante el uso de Petrel, un software utilizado en áreas de exploración y producción en la industria de hidrocarburos. Una vez cargado el volumen sísmico dentro de Petrel se definió un sistema de coordenadas ‘Colombia Bogotá Zone’ para la correcta ubicación espacial de este.

Al finalizar la carga de líneas sísmicas y definir el sistema de coordenadas, se generó un mapa de superficies de 2 horizontes marcados con las herramientas automapeo y mapeo manual. El primer horizonte correspondía al fondo marino y dio como producto un mapa batimétrico en TWT, mientras que el segundo horizonte correspondía a la base del Cuaternario con el cual se generó una superficie o mapa paleobatimétrico.

Para convertir los datos de TWT a metros en las superficies generadas se utilizó un pseudopozo (Well-1X) con registros de velocidades, ya que no se contaba con ningún pozo disponible con registros eléctricos dentro de volumen sísmico (por confidencialidad). Por esta razón se utilizó un pozo cercano al volumen sísmico y se escogió el único registro disponible. Con los datos del pozo se eligió una zona para la ubicación del pseudopozo con un mapa batimétrico de acceso libre, donde una de las profundidades dentro del volumen sísmico tenía que ser similar a una de las registradas en el Pozo cercano. Con la creación y ubicación del pseudopozo se visualizó la correcta intersección entre el pozo y las líneas sísmicas, para evitar cualquier tipo de inconvenientes o desfases.

Luego de ubicar el pseudopozo, se generó una grilla 3D y 3 superficies suavizadas correspondientes a una zona sin reflectores en la línea sísmica (parte superior), el fondo marino y la base de las líneas sísmicas. Debido a la cantidad de líneas sísmicas y el peso de los archivos (12 Gb aproximadamente), realizar los modelos de velocidades requería un dispositivo con mejores especificaciones a comparación del utilizado para el proyecto, esto implicó un recorte de

la zona W, recorte en escala vertical (hasta 3000 ms) de las líneas sísmicas y una visualización de líneas de 3 en 3.

Una vez recortado el volumen sísmico, se generó dentro de la grilla 3D 2 modelos, uno por capas y otro por zonas, teniendo en cuenta las superficies generadas. Estos modelos fueron los adecuados para generar dos nuevos modelos dentro de la grilla 3D en la ventana ‘proceso’ de Petrel. Los modelos generados fueron modelo por intervalos y por promedio, los cuales se basaron en el registro de velocidades del pseudopozo (Figura 4). Una vez generado estos 2 modelos se realizó un nuevo modelo final de velocidad, que no consistía en una vista de una grilla 3D sino en un set de datos con información desplegada en una tabla.

Con este último modelo de velocidad se realizó la conversión de las 2 superficies generadas (batimetría y base del Cuaternario), con el fin de conocer mejor las profundidades de las primeras capas de sedimentos y a las que se encuentran otros depósitos sedimentarios de interés. La conversión de ambas superficies se realizó dentro de la ventana de interpretación sísmica y con la herramienta conversión-profundidad de Petrel.

Las 2 superficies convertidas del dominio del tiempo (TWT) a profundidad (m) se exportaron a GlobalMapper y ArcGIS como archivos georreferenciado con el fin de mejorar la visualización y los colores de estas. En GlobalMapper se trabajó el modelo de elevación digital (DEM) del fondo marino y se generó un perfil batimétrico. En ArcGIS se trabajó con el Modelo de elevación digital correspondiente a la base del Cuaternario, ya que el uso de sombras en este modelo no era el adecuado para visualizar las características de la superficie. Sin embargo, con este software también se generaron 2 superficies raster basadas en el archivo .TIFF del fondo marino con las herramientas slope y aspect. Estas superficies representan el mapa de pendientes agrupadas en 5 rangos y el mapa de direcciones de las pendientes.

Por otro lado, se generó un mapa multicriterio teniendo en cuenta 2 factores: influencia de fallas en una zona de 1,5 km y valores de las pendientes en grado. Este mapa multicriterio representa zonas en el fondo marino susceptibles por deslizamiento, el cual se encuentra dividido en 4 rangos: nivel muy bajo, bajo, medio y alto. La generación de este mapa se realizó con la herramienta 'Con' de ArcGIS, teniendo en cuenta el raster de pendientes y las fallas identificadas en las líneas sísmicas.

#### **5.4 Análisis de datos**

El fondo marino en las líneas sísmicas se identificó como un horizonte correspondiente a la primera aparición de reflectores ya que indican el cambio de velocidad de la onda P que se encontraba viajando por el agua y luego atraviesa la primera capa de sedimentos, mientras que el horizonte de la base del Cuaternario se marcó teniendo en cuenta bibliografía previa, ya que no se contaba con topes de pozo o un horizonte guía.

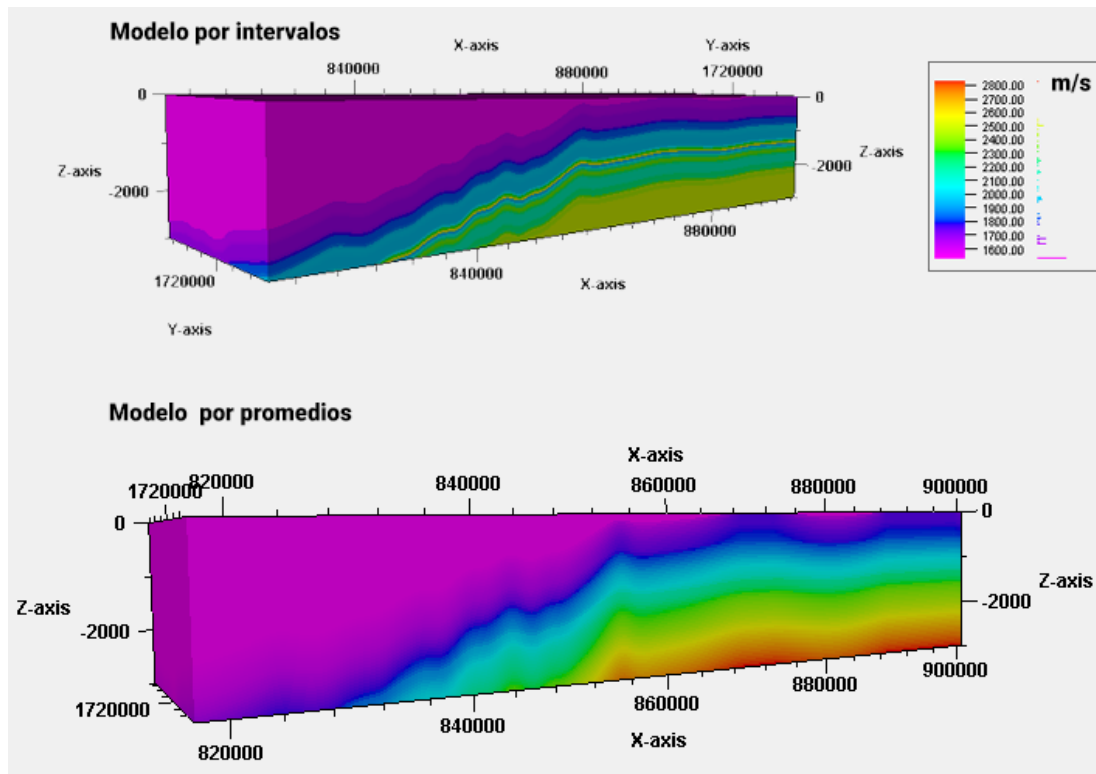
Con las superficies generadas y convertidas a metro, se reconocieron las profundidades máximas y mínimas, al igual que las pendientes agrupadas en 5 rangos y sus respectivas direcciones preferenciales por zonas. Asimismo, se identificaron en los modelos de elevación digital las geoformas del fondo marino, se midieron sus extensiones y anchos y se clasificaron con base en bibliografía.

La interpretación de las facies sísmicas se realizó teniendo en cuenta la continuidad y amplitud de los reflectores, asignándole una escala de colores rojo-blanco-negro a las líneas sísmicas con el fin de reconocer de mejor manera las amplitudes. Por otro lado, en las líneas sísmicas se marcó con la herramienta multi-z de Petrel las geoformas correspondientes en el subfondo (diapiros), y al igual que los demás horizontes mencionados anteriormente, se generó para este multi-z un mapa de superficie y se transformó de TWT a metros con el modelo de

velocidad. La generación de la superficie permitió una visualización en 2D y 3D de las geoformas identificadas en las líneas sísmicas para así poder reconocer valores de altos y anchos de los diapiros.

El resto de las características visibles en las líneas sísmicas (fallas o superficies erosivas) fueron representada por medio de esquemas realizados con Photoshop. Con este software se pudo resaltar depósitos sedimentarios y generar gráficos similares a las líneas sísmicas para visualizar de mejor manera los rasgos identificados.

Por último, en el mapa multicriterio de susceptibilidad por deslizamiento se identificaron las zonas con mayor potencial de ocurrencia del fenómeno. La selección de estas zonas se basó en la cantidad de celdas con valores de niveles medios y altos que se encontraran muy agrupadas o con altas densidades en el mapa.



**Figura 4.** Modelo por intervalo y modelo por promedios de velocidades basadas en los horizontes correspondientes a la batimetría, tope y base de las líneas sísmicas.

## 6. Resultados

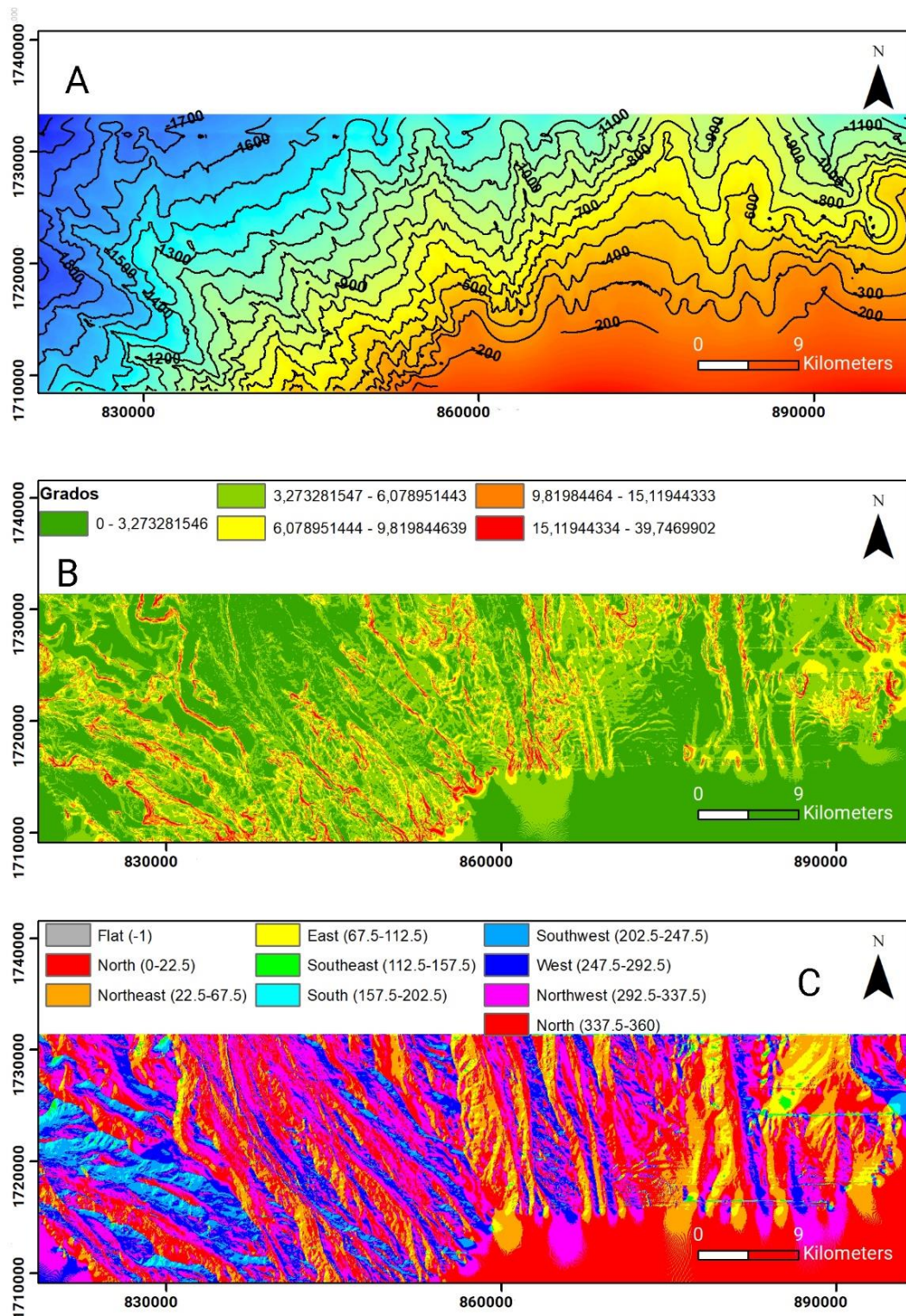
### 6.1. Batimetría y Modelo Digital de Elevación

El procesamiento y análisis de las líneas sísmicas que componen el volumen Barranquilla 3D permitió generar un mapa batimétrico y a partir de este, un modelo de elevación digital del fondo marino. Teniendo en cuenta los reflectores y la impedancia acústica se identificaron las primeras capas de sedimentos en el fondo marino representadas en reflectores con amplitudes muy altas y continuos. De igual manera los modelos de velocidades por intervalos y promedio permitieron reconocer tanto las capas como las zonas en las que se encuentran dispuestos los horizontes marcados. Estos modelos de velocidades promedio y por intervalos determinan que para las primeras capas de sedimentos la onda P presenta velocidades entre 1700 m/s y 1800 m/s y que corresponden a las marcadoras del lecho marino.

El mapa batimétrico obtenido luego de la interpretación de líneas sísmicas evidencia una región de la plataforma continental que se extiende cerca de 9 km y presenta profundidades máximas de -200 m, mientras que el resto del área perteneciente al talud continental presenta profundidades desde -200 m hasta -2081.13m (Figura 5A).

El talud continental presenta cambios en elevaciones abruptos, moderados y leves con pendientes que varían desde  $0^{\circ}$  hasta  $39,79^{\circ}$ , con una mayor agrupación de valores en un rango de  $0^{\circ}$  a  $12^{\circ}$  (figura 5B). Las pendientes de grados mayores están asociadas comúnmente al talud continental y presentan valores superiores a los  $15^{\circ}$ , sin embargo, es posible encontrar pendientes con menores grados, ya que en el talud continental hay pequeñas alternancias entre planicies y escarpes.

Por otro lado, el mapa de dirección de pendientes o mapa de aspecto en el fondo marino evidencia en su mayoría direcciones preferenciales NW, N y W en toda la zona de estudio. Sin embargo, es posible resaltar algunas zonas al oeste donde las pendientes de las geoformas presentan direcciones preferenciales SW, W y S o de colores más fríos (Figura 5C).



**Figura 5.** Mapa batimétrico de la zona de estudio. Los colores cálidos presentes en la zona SE del mapa representan una pequeña parte observable de la plataforma continental en el área de estudio **B**. Mapa de pendientes generado en ArcGIS y con una clasificación de valores en 5 rangos. La mayoría de las pendientes altas corresponden al inicio del talud continental o a zonas donde se encuentran sistemas canal-dique. **C**. Mapa de aspecto con direcciones de pendientes, la mayoría de las direcciones de las pendientes tienden hacia el NW, N y W.

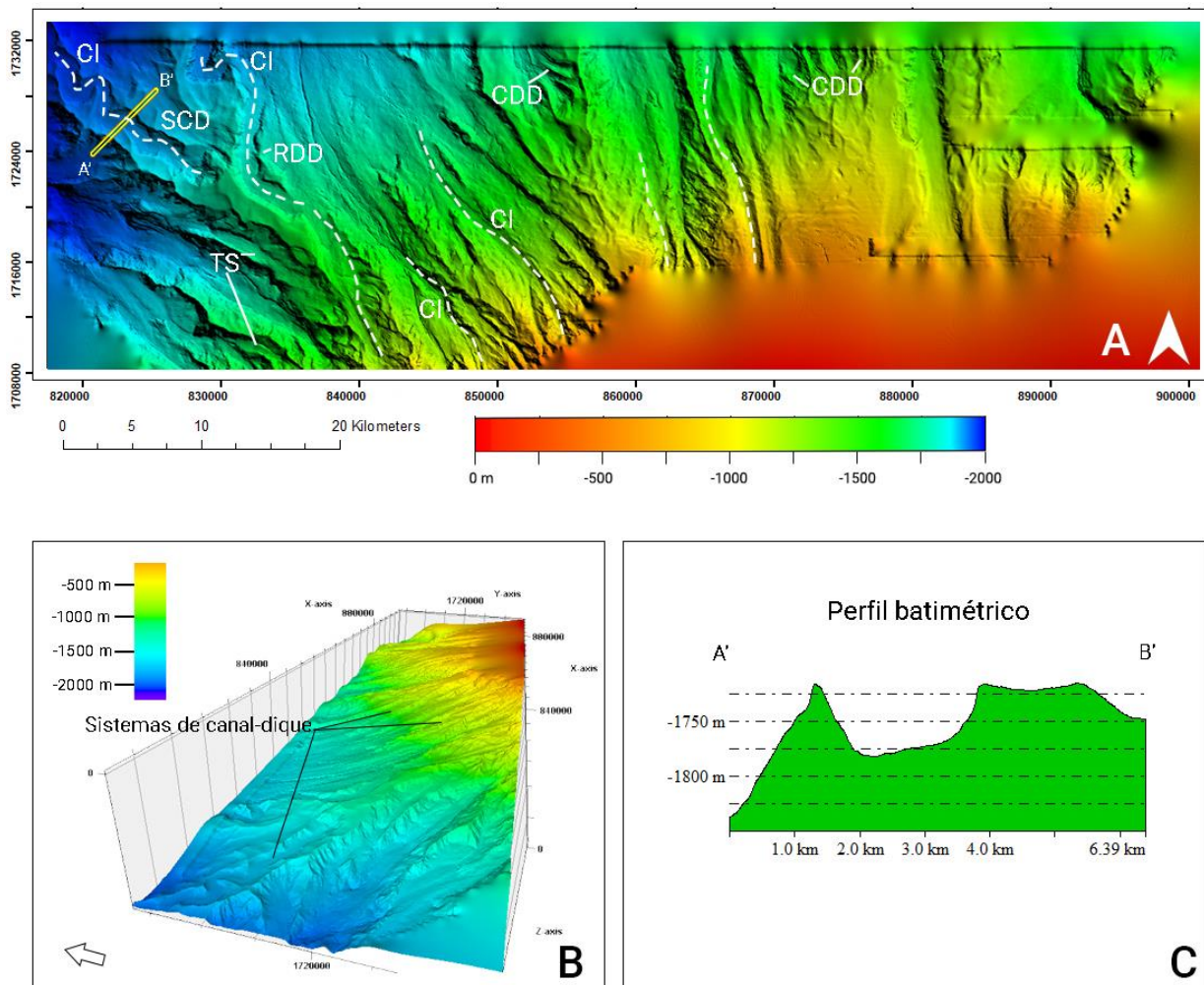
El modelo de elevación digital del fondo marino evidencia grupos de canales clasificados como sistemas de canal-dique, que en su mayoría se presentan en zonas NW y S del volumen sísmico (Figura 6A). Estos sistemas presentan canales en formas meándrica con direcciones preferenciales de flujo SW-NW y S-N, longitudes que varían entre los 12 km y 20 km y anchos de 2,2 km (distancia entre las paredes de los canales). Se reconocen a su vez un grupo de canales meándricos en la zona S del fondo marino, que hacen parte de un sistema de canal-dique con canales de extensiones menores a 14 km. Estos canales resaltan en el fondo marino por presentar una terminación abrupta o poco moderada, proseguidos de una zona casi plana que corresponde a un depósito sedimentario que pudo haber interrumpido el recorrido de los canales.

Por otro lado, el sistema de canal-dique identificado al NW del fondo marino presenta diques con elevaciones de aproximadamente 50 m con referencia al fondo de los canales (Figura 6C) y es posible reconocer en estos algunos registros de erosión. A los lados de los canales se encuentran remanentes de diques reconocidos como depósitos sedimentarios con elevaciones muy distintas a las circundantes. Estos remanentes de diques son producto de una pérdida de morfología de antiguos diques que se vieron afectados por depósitos de otra naturaleza, que a pesar de solo encontrarse como tramos, permiten identificar una dirección del antiguo canal o estimar la forma original de este (Figura 6A).

Otros depósitos sedimentarios presentes en el fondo marino son las terrazas submarinas, las cuales están mayormente relacionadas al sistema de canal-dique de la zona W. Estas terrazas submarinas se evidencian en formas de depósitos sedimentarios casi planos o en plataformas laterales a los diques (Figura 6A), enmarcando una elevación distinta en forma de escalón o una interrupción de los escarpes de las paredes de los diques. Estas terrazas submarinas llegan a presentar extensiones de hasta 10 km y anchos máximos de 1,0 km.



Se reconocen algunas zonas sombreadas y rugosas que son identificadas o clasificadas como cicatrices de deslizamiento (figura 6A). Estas corresponden a planos muy notorios en zonas laterales de los sistemas de canal-dique y que indican anteriores eventos de deslizamiento en la zona. Cabe resaltar que la distribución de estas cicatrices de deslizamiento no presenta algún tipo de patrón en términos de ubicación, es decir, que pueden encontrarse tanto en zonas cercanas o agrupadas como en zonas altamente distanciadas.



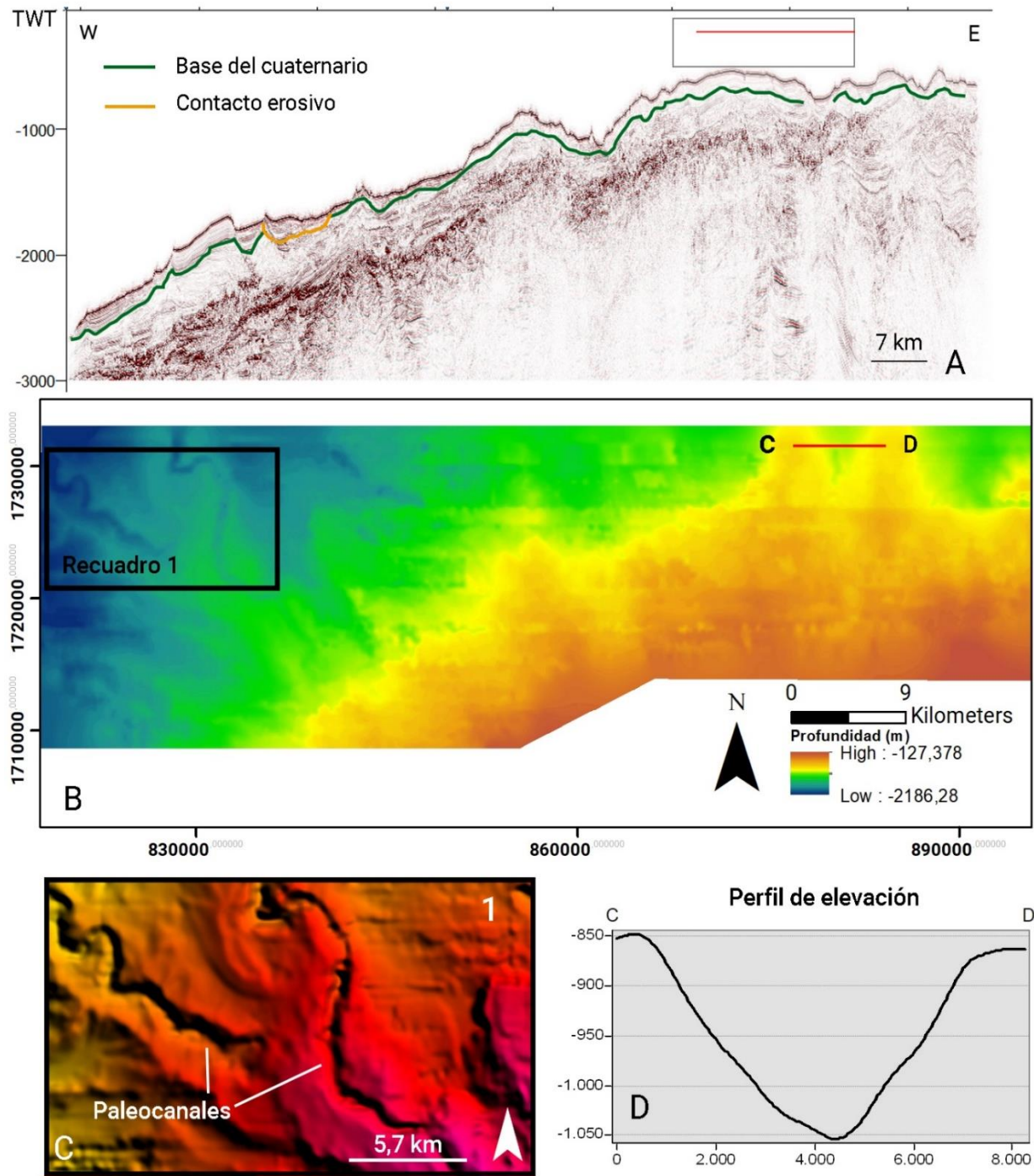
**Figura 6.** A. Rasgos geomorfológicos del fondo marino. Las líneas punteadas son la interpretación de los canales meándricos de sistemas canal-dique, al igual que sus direcciones. B. Modelo digital de elevación del fondo marino en vista 3D con señalización de sistemas de canal-dique. C. Perfil batimétrico de A' a B' que atraviesa un canal meándrico. SCD: Sistemas de canal-dique; TS: Terrazas; CI: Canales; CDD: Cicatrices de deslizamiento.

## 6.2. Superficie de la base del Cuaternario

El reflector que marca la base del Cuaternario se caracteriza generalmente por tener una amplitud alta que separa las capas de sedimentos recientes (menor a 2,58 Ma) de otros depósitos sedimentarios más antiguos (Figura 7A) (Sarmiento-Orjuela, 2019). Sin embargo, este parámetro no es igual en toda la extensión de las líneas sísmicas, puesto que la presencia de superficies erosivas y estratos acuñados permite el contacto entre la base del Cuaternario con algunos otros reflectores diferentes o depósitos sedimentarios de distinta naturaleza.

La superficie generada a partir del horizonte correspondiente a la base del Cuaternario representa rasgos geomorfológicos similares a los del fondo marino, pero con una mayor cantidad de zonas donde el registro ha sido borrado por procesos erosivos o no pudo ser correctamente identificado por la calidad de las líneas sísmicas. El modelo de elevación digital correspondiente a la base del Cuaternario se generó a partir del mapa paleobatimétrico con base en el horizonte. En este se evidencian dos paleocanales meándricos muy similares en su forma, pero con pequeños rasgos distintivos entre ellos (Figura 7B). El primer paleocanal presenta un ancho de 1,1 km, un origen en las zonas más sur del mapa y una extensión de 14 km aproximadamente, mientras que el segundo paleocanal cuenta con un ancho de 1,6 km, una extensión de 4,2 km y un origen mucho más al norte del mapa (Figura 7C).

En el lado oeste del modelo de elevación de la base del Cuaternario las pendientes varían en menor grado, con valores inferiores a  $10^\circ$  y sin presencia de paleocanales o antiguas zonas de flujo. Sin embargo, en la superficie se resalta la presencia de dos elevaciones atípicas en el lado W, que presentan entre ellas una zona convexa de cerca de 4 km de ancho y que se encuentra distanciando los dos picos (Figura 7D).



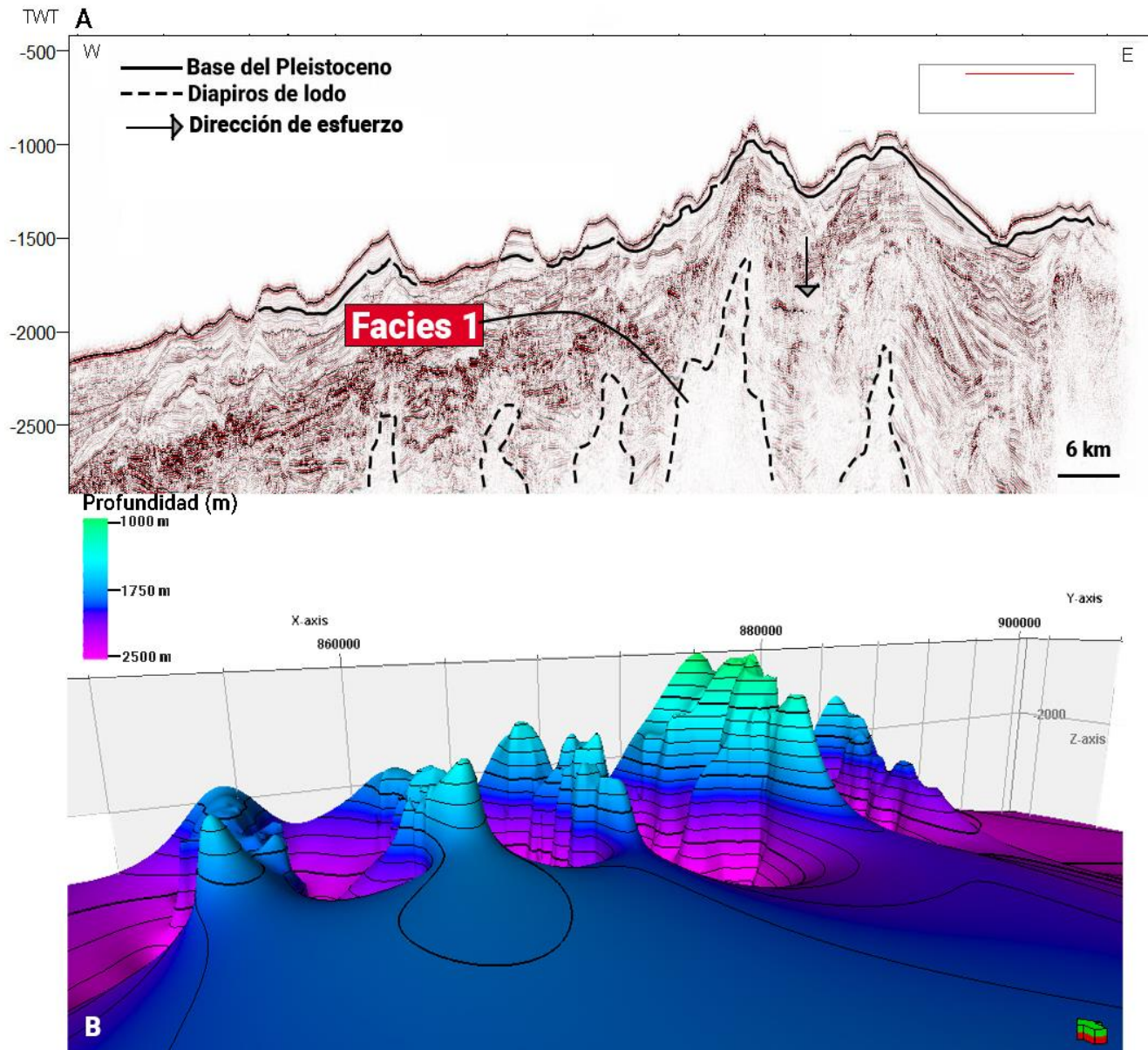
**Figura 7.** A. Línea sísmica IL-1820, horizonte marcado como base del Cuaternario en el subfondo. B. Modelo de elevación digital a partir de mapa paleobatimétrico de la base del Cuaternario. C. Vista de 2 paleocanales en la zona NW en un mapa con sombras y tonalidades fuertes. D. El perfil de elevación del punto C al D evidencia la zona convexa entre las 2 elevaciones atípicas en el modelo digital de elevación, indicando una deformación en los depósitos del Cuaternario.

### 6.3. Facies sísmicas

El set de líneas sísmica posee una variedad con respecto a los reflectores y sus amplitudes, ya que estas van desde muy bajos (tonos blancos y claros) a muy altos (tonos negros o rojos). Gracias a la diferencia de los reflectores y las amplitudes en todas las líneas sísmicas se pudo identificar 3 facies sísmicas correspondientes a distintos depósitos sedimentarios. Los reflectores en la base de las líneas sísmicas o en el intervalo de 1500 ms a 3000 ms se reconocen como la facies sísmica 1, la cual presenta deformaciones, formas en cono y reflectores con amplitudes bajas y sin continuidad (Figura 8A). Esta facies corresponde a una serie de intrusiones de lodo, de las cuales se diferenciaron 5 diapiros ubicados a distancias entre -1250 m y -2750 m desde el fondo marino hasta el tope de las geoformas.

Las intrusiones de lodo aparecen deformando los horizontes suprayacentes u otros depósitos sedimentarios, cambiándolos a una geometría con pliegues e irregularidades que dependen de que tan grande es el diapiro. Estas geoformas se presentan como producto de una sobrepresión de las capas de sedimentos suprayacentes que crean una dirección de esfuerzo vertical (de arriba hacia abajo) y a su vez permite la intrusión o el ascenso del material. Basado en esto es posible clasificar las geoformas de acuerdo con la elevación (con un punto de referencia en la base de las líneas sísmicas) y al ancho que presente cada una. Así, se reconocen 2 diapiros pequeños ubicados continuamente al W, presentan elevaciones de 470 m aproximadamente y anchos de 2,5 km, mientras que los 3 diapiros restantes se clasificaron como medios ya que sus elevaciones varían entre los 1000 m y 1565 m (figura 8B) y sus anchos entre 6 km y 8 km.



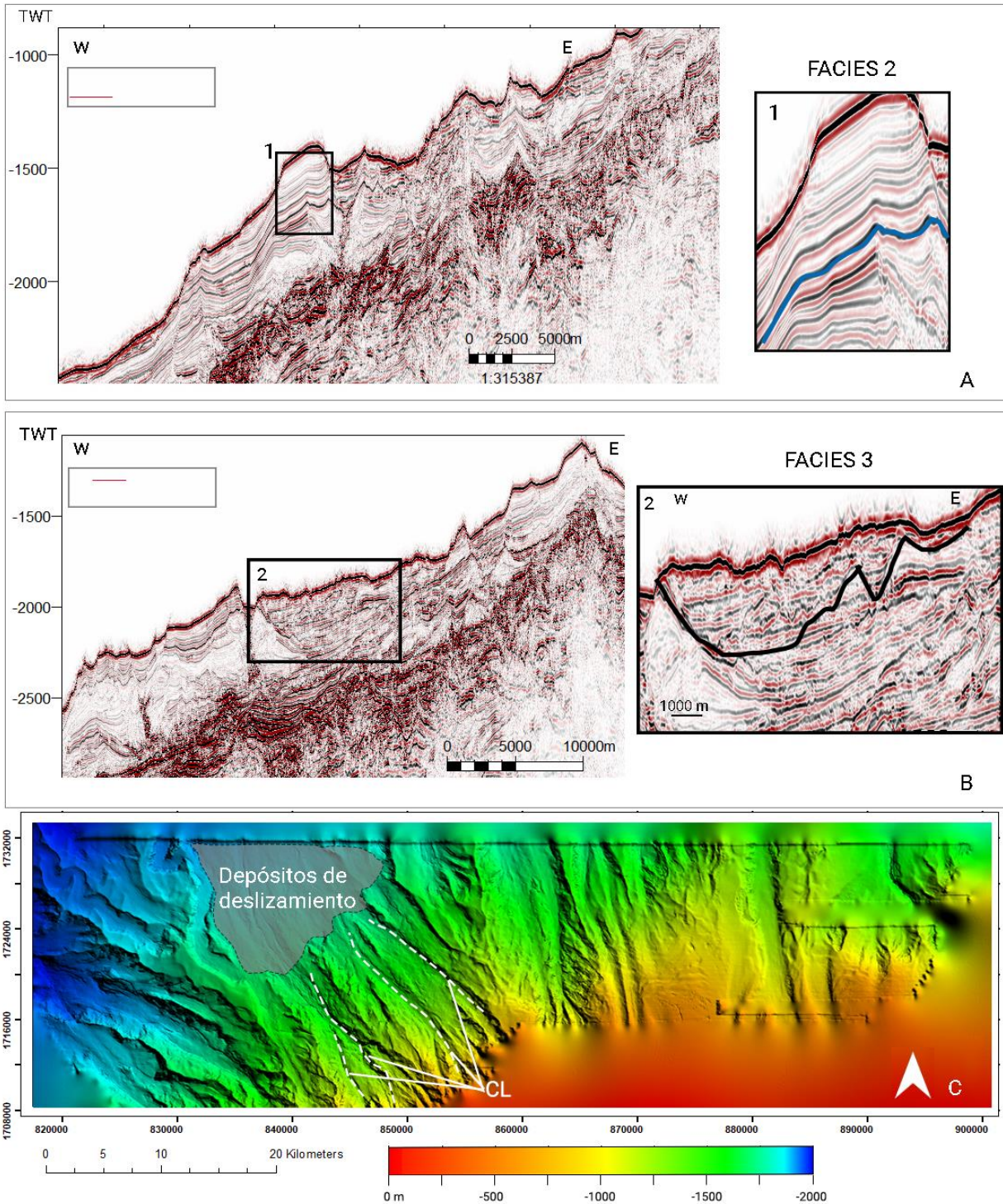


**Figura 8. A.** Diapiros de lodo vistos en línea sísmica IL-1666, identificación de esfuerzo vertical y visualización de la facies 1. **B.** Vista en 3D y en profundidad de los 5 diapiros de lodos marcados con multi-z.

Una segunda facies sísmica corresponde a los depósitos del Cuaternario, los cuales se identificaron con reflectores continuos, amplitudes altas, espesores menores a 210 m (Figura 9A) y que en ocasiones aparecen como rellenos de canales. Debido a la calidad de las líneas sísmicas, es más fácil reconocer estas facies sísmicas en la zona W del área de estudio, puesto que en zonas E de algunas líneas sísmicas los reflectores correspondientes a los depósitos del Cuaternario presentaban igual continuidad, pero amplitudes un poco más bajas. A pesar de presentar

reflectores un poco distintos, la identificación de esta facies sísmica en las zonas orientales de las líneas fue muy similar a la de la zona opuesta, ya que seguía evidenciándose un reflector distintivo con una alta amplitud que indicaba la base del Cuaternario.

La tercera facies sísmica corresponde a reflectores caóticos y con amplitudes altas que representan depósitos de deslizamiento. La disposición de estos reflectores crea un contacto erosivo que limita a los depósitos sedimentarios representados en la segunda facies sísmica (figura 9B) y que impide reconocer de mejor manera la base del Cuaternario. Esta facies sísmica corresponde a los depósitos sedimentarios que evitan la continuidad de algunos canales meándricos y la desaparición de zonas de diques, ya que presentan extensiones de más de 10 km en un plano 2D (Figura 9C). A parte de estos depósitos de deslizamiento, es posible encontrar algunos otros reflectores caóticos en zonas con escarpes o relacionadas a cicatrices de deslizamiento, pero que no llegan a presentar grandes espesores o extensiones a comparación del identificado anteriormente.



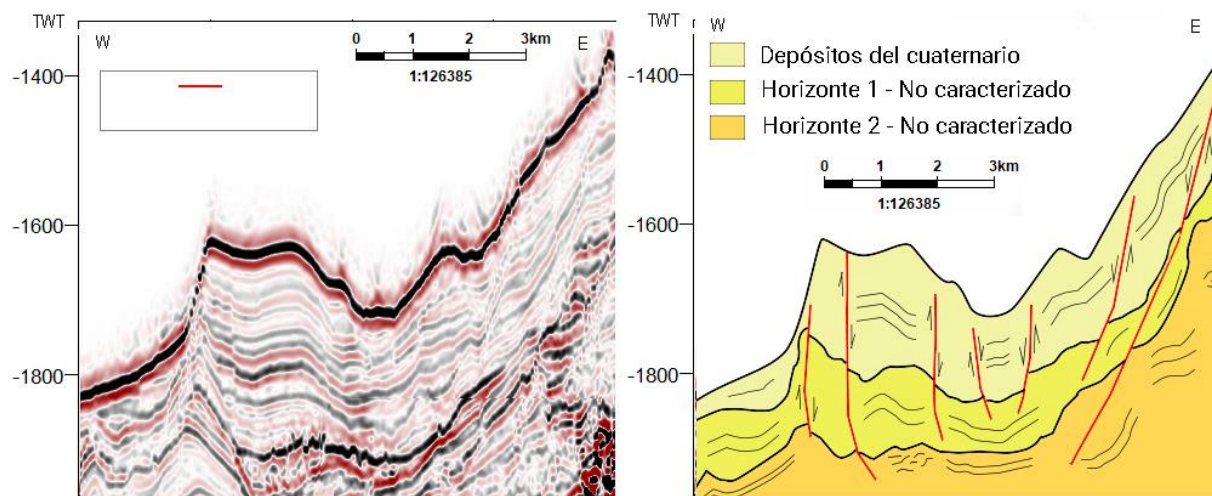
**Figura 9. A.** Reflectores de depósitos sedimentarios del Cuaternario (facies 2) en la línea sísmica IL-2126. La línea azul en el recuadro 1 enmarca la base del Cuaternario, distinguible por un reflector con amplitud alta y muy continuo. **B.** Facies sísmica 3 representada o distinguible por reflectores caóticos con amplitudes altas y poca continuidad, representan depósitos de deslizamiento. La línea inferior negra en el recuadro 2 representa el contacto erosivo de los depósitos de deslizamiento con otros tipos de depósitos sedimentarios. **C.** Ubicación de los depósitos de deslizamiento identificados en las líneas sísmicas. Estos depósitos interrumpen un sistema de canal-dique o algunos canales reconocidos en el fondo marino. CL: canales.



Además de las facies sísmicas y la asociación de esta a un tipo de depósito sedimentario, se identificaron fallas normales que producen un descenso de bloques respecto a otros e interrupciones en los reflectores y horizontes formando estructuras tipo graben. La mayoría de estas fallas son superficiales y no tienden a atravesar capas de sedimentos a altas profundidades, puesto que presentan extensiones menores a -500 m de profundidad.

En todas las líneas sísmicas se evidencian este tipo de fallas que pueden llegar a interceptar con el lecho marino, y que de igual manera afectan depósitos sedimentarios del Cuaternario (Figura 10). Sin embargo, la mayoría de estas fallas no presentan extensiones significativas en un plano 2D, por lo que considerar cartografiarlas no sería muy significativo. Por otro lado, algunas de estas fallas si tienen relación con el fondo marino y llegan a presentar extensiones mayores de 7 km en la superficie, además, tienden a estar ubicadas al NW y E del volumen sísmico. Con la identificación de las fallas normales y las estructuras tipo graben se reconoce que el control estructural de la zona está asociada únicamente a este tipo de fallas con bajas extensiones, por lo que no se consideran la causa de los pliegues presentados, sino únicamente el descenso de algunos bloques con capas de sedimentos.





**Figura 10.** Representación de fallas normales en la zona norte del volumen sísmico. Set de falla normales que llegan a cortar el fondo marino y los depósitos sedimentarios del Cuaternario.

#### 6.4. Mapa de riesgo por deslizamiento (multicriterio)

El área de estudio se encuentra dividida por 5 niveles de susceptibilidad por deslizamientos teniendo en cuenta la clasificación y factores de riesgos determinadas por Ayalew y Yamagishi (2005). Las pendientes fueron el principal factor para determinar zonas susceptibles a eventos de deslizamientos, agrupándose en 5 rangos (Tabla 1). El mapa de susceptibilidad para la zona de interés solo presenta 4 niveles, de muy bajo a alto, ya que los valores de pendientes se encuentran únicamente en un rango de  $0^{\circ}$  a  $39,74^{\circ}$ .

| <i>Clasificación de zonas susceptibles a deslizamientos por pendientes</i> |          |
|--|----------|
| Pendientes ( $^{\circ}$ )  | Niveles  |
| 0-3  | Muy bajo |
| 4-15   | Bajo     |
| 16-30  | Medio    |
| 31-45  | Alto     |

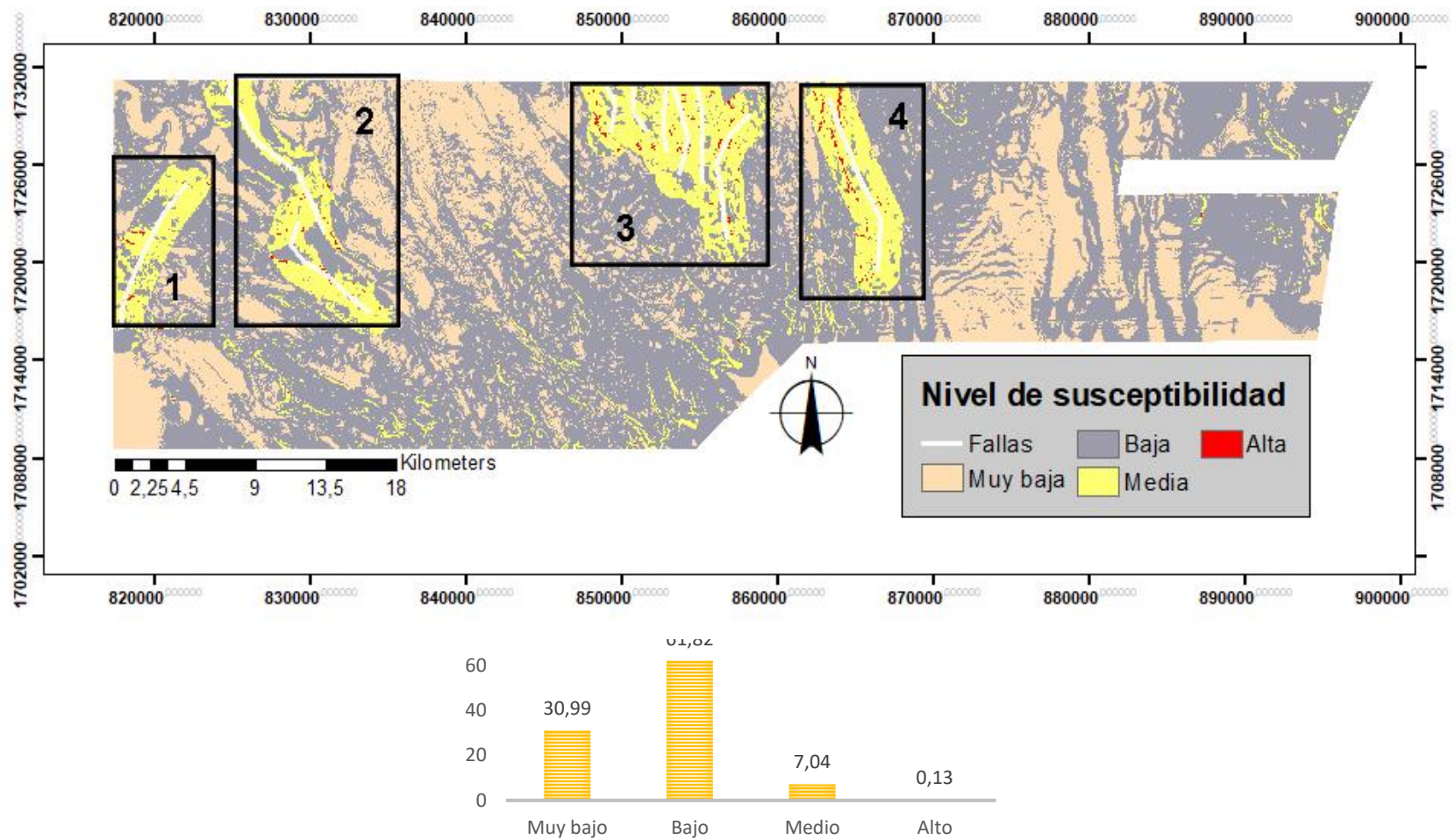
**Tabla 1.** Niveles de riesgo por deslizamientos asociados a pendiente. Modificado de Ayalew y Yamagishi (2004).

Factores como fallas cartografiadas que atraviesen la zona o geoformas muy elevadas que puedan presentarse en la superficie, alteran los niveles de riesgos para lugares que cuenten con cualquier tipo de pendiente. Según León y Somoza (2011) las fallas tienen una zona de influencia de 1,5 km, lo que incrementa el nivel de susceptibilidad de cualquier área a un nivel más alto al que presentaba anteriormente.

El mapa de riesgo por deslizamiento representa las zonas categorizadas por los 4 niveles únicamente determinados por pendientes y fallas, debido a que no se encuentra ningún aumento de nivel de riesgo por presencia de geoformas como domos con pendientes altas. La distribución de niveles de riesgos está dominada en su mayoría únicamente por zonas con pendientes, mientras que solo un 6,8% tiene relación a fallas que aparecen en la superficie.

La distribución porcentual de los niveles de acuerdo con la susceptibilidad no presenta uniformidad, ya que se encuentran valores que difieren hasta en un 60% (Figura 11). El valor porcentual más bajo corresponde a las zonas con alta susceptibilidad, con un 0,13%, seguido de un porcentaje de 7,04% para las zonas de susceptibilidad media, 30,99% y 61,82% para las zonas de susceptibilidad muy baja y baja respectivamente.

Se identificaron 4 zonas exactas con niveles medios y altos (Figura 11), las cuales se distancia entre ellas desde los 0 km hasta los 1,5 km y se ubican en la zona más alejada del talud continental, mientras que algunas otras zonas con niveles medios y altos si se limitan a el talud continental, pero presentan densidades de celdas muy bajas. Por otro lado, los niveles altos se distribuyen sin mantener una densidad de puntos altas y en su mayoría se presentan dentro de la zona número 3, haciendo de esta la zona más susceptible dentro del área de estudio.



**Figura 11.** Mapa de susceptibilidad por deslizamiento. Representaciones de zonas con niveles muy bajos, bajos, medios y altos, resaltando en 4 recuadros las zonas con mayor susceptibilidad por deslizamiento asociadas a pendientes con mayores grados e influencia de fallas normales. El diagrama de barras corresponde a la cantidad porcentual de celdas clasificadas de acuerdo con los niveles de susceptibilidad.

## **7. Discusión**

### **7.1 Geomorfología**

El fondo marino del volumen sísmico presenta rasgos geomorfológicos distintivos de un ambiente marino-fluvial, con una presencia de sistemas de canal-dique distribuidos de manera heterogénea en toda la zona que evidencian el registro de la evolución geomorfológica del complejo.

El sistema de canal-dique más alejado de la plataforma continental es el reflejo de este tipo de registros, donde la zona lateral E de uno de los diques evidencia una desaparición de un gran tramo de este, mientras que la zona lateral W está presentando en su totalidad las características completas del canal meándrico y del dique. Esta falta de continuidad en la morfología y batimetría del fondo marino se asocia a eventos de deslizamientos, donde estos depósitos sedimentarios recubren solo zonas exactas del sistema de canal-dique, pero que no afectan al registro de dirección y forma de los canales.

De igual manera, el sistema de canal-dique que presentan interrupciones repentinas en grandes tramos se asocia a eventos de deslizamiento, donde los depósitos de sedimentos reconocidos como la facies 3 recubren una gran parte de las geoformas, evitando que pueda observarse una dirección y forma específica de los canales. Estos canales están asociados a un evento de deslizamiento reciente de posibles estructuras geomorfológicas (tramos de los mismos canales) o zonas estructuralmente dominada por procesos extensivos que irrumpieron o destruyeron parte de los sistemas de canal-dique.

Algunos depósitos sedimentarios recrean pequeñas elevaciones y variaciones desordenadas en la superficie que se asocian a cicatrices de deslizamientos. Estas indican que las zonas adyacentes presentarían una mayor vulnerabilidad a procesos o eventos de deslizamiento, puesto que aún no se evidencia que las estructuras estén en su mayoría removidas. Además, los

depósitos encontrados cercanos a estos son productos de 2 eventos principales y muy comunes en la zona de estudio: erosión y depositación. Consisten en la pérdida y transporte de material de sistemas de canal-dique, donde las zonas con pendientes de mayor grado sufren de remoción en masa y el nuevo material desprendido empieza a ser transportado hasta llegar a depositarse. La mayoría de los depósitos sedimentarios producto de eventos de deslizamientos no se encuentran a más de 2 km de las cicatrices de deslizamiento o de la zona de donde fueron removidos.

Por otro lado, algunas estructuras geomorfológicas son evidentes con la superficie de la base del Cuaternario, donde se presentan 2 canales meándricos que pueden ser relacionados a los encontrados en el sistema de canal-dique al NW del fondo marino, ya que la dirección de flujo y morfología es muy similar a la expuesta por depósitos recientes. Fue posible reconocer una zona con elevaciones atípica dentro del modelo de elevación de la superficie de la base del Cuaternario, que corresponde a una deformación por la presencia de 2 diapiros de lodo distanciados que pliegan las capas de depósitos sedimentarios suprayacentes y permiten la aparición de una zona convexa entre las 2 elevaciones o picos.

## **7.2 Geoformas, fallas y depósitos del subfondo**

Los depósitos representados en la facies 2 corresponden a material sedimentario no consolidado y la distinción de esta facies en las líneas sísmicas permite estimar que hay zonas con variación de espesores, indicando que los depósitos sedimentarios del Cuaternario, a pesar de haberse depositados, pueden sufrir de procesos erosivos.

De igual forma, los depósitos sedimentarios de deslizamientos reconocidos en la facies 3 se encuentran relacionados con geoformas preexistentes (paleocanales o sistemas de canal-dique) y de control estructural evidenciado por los sets de fallas normales. Estos depósitos recubren áreas extensas entre los diques de los canales, permitiendo la aparición de superficies erosivas que crean un contacto lateral de 2 depósitos sedimentarios totalmente distintos (facies 2 y 3).

Por otro lado, las capas de sedimentos, en su mayoría, se encuentran plegadas unas sobre otras, incluyendo zonas del basamento y depósitos más recientes. Estos pliegues son productos de las geoformas ubicadas en el subfondo pero que no llegan hasta la superficie. Se debe resaltar que al no tener registros de fallas inversas que produzcan pliegues, no es posible afirmar que las geometrías de las capas sean producto de este tipo de control estructural, ya que únicamente se identificaron fallas normales que permiten la aparición de estructuras tipo graben.

Estas geoformas identificadas en el subfondo se reconocen como diapiros de lodo que están compuestos por material sedimentario con densidades bajas y con una sobrepresión por las capas que se encuentran depositadas y compactadas sobre estas (Masse 1977). La sobrepresión implica una deformación de los lodos, ya que al encontrarse a mayor profundidad tienden a ascender o intruir a través de espacios disponibles, o en su defecto, a empujar las demás capas suprayacentes, eliminando su horizontalidad original y disponiéndolas en geometrías onduladas.

Es posible estimar que las direcciones de esfuerzo asociadas a la formación de los diapiros de lodos están netamente regidas a inversión de densidad y compresión vertical, puesto que no hay evidencia de ascenso de material por fallas ni anticlinales que compriman lateralmente. La altura alcanzada por estos diapiros puede relacionarse con la cantidad de material sedimentario ubicado sobre estos, sin embargo, otros factores pueden afectar el movimiento vertical de este tipo de material como lo es la cantidad de %TOC (Morales y Rodríguez, 2005).

### **7.3 Geoamenazas**

La batimetría, rasgos geomorfológicos, depósitos del subfondo y fallas normales mantienen un control completo sobre la zona de estudio, haciendo de esta un lugar complejo y posiblemente susceptible a deslizamientos.

Las zonas enmarcadas como cicatrices de deslizamiento y reflectores caóticos pequeños son registros de la ocurrencia de eventos de deslizamiento de magnitudes bajas o medias en

lugares con pendientes altas. Sin embargo, depósitos con espesores más grandes y con mayores extensiones dan indicio de que la zona es altamente inestable y que los eventos de deslizamiento han sido de gran magnitud.

Las zonas más susceptibles a deslizamientos están estrechamente relacionadas a las altas pendientes e influencia por fallas. A pesar de evidenciarse fallas superficiales con pocas extensiones en profundidad, estas están interceptadas con el fondo marino, haciendo de este una superficie altamente inestable y con una probabilidad de deslizamiento en casi que cualquier momento. La densidad de niveles de susceptibilidad alta y media hacen que 4 zonas sean potencialmente peligrosas, presentando una con mayor susceptibilidad a deslizamiento que el resto. Las 4 zonas enmarcadas se determinan como las zonas más susceptibles del área de estudio, por lo que deben ser vistas y evaluadas con mayor precaución al momento de realizar trabajos de exploración y explotación de hidrocarburos, y que a su vez ayudarían en la creación o modificación de algún plan o manejo costero que evite afectaciones a infraestructura o asentamientos cercanos a esta área.

Aunque se determinan 4 zonas de potencial riesgo es importante establecer que los niveles de susceptibilidad a deslizamientos son solo rangos con probabilidades de ocurrencias delimitado por 2 factores, porque incluso en zonas donde las pendientes sean mayores a  $2^\circ$  podrían ocurrir este tipo de eventos (Highland and Bobrowgsky, 2008), ya que factores como sobrepresión en los poros, altos aportes de sedimentos, cohesión de material o presencia de hidratos de gas, pueden desencadenar deslizamientos en zonas con muy bajas pendientes (Borrell et al., 2016; Urlaub et al. 2015)

Es importante aclarar que la posible ocurrencia de deslizamientos se puede llegar a interpretar como un evento regional más que local, donde la energía que se libera al ocurrir el colapso de material podría llevar a la formación de microtsunamies, que de una u otra forma

afectaría las regiones aledañas al volumen sísmico. Sin embargo, la ocurrencia de un deslizamiento no es la única causa de ese tipo de eventos, ya que para que un deslizamiento produzca un tsunami depende de igual forma de otras variables como dirección de deslizamiento, volumen de sedimento, aceleración inicial etc. (Bardet et al., 2003; Jansen et al. 1987)

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

### **8.1 Conclusiones**

El fondo marino comprendido dentro del volumen sísmico presenta solo una pequeña parte de plataforma continental, mientras que el resto del área hace parte del talud continental y zonas más alejadas con pendientes que varían desde de los 0° hasta aproximadamente 39°. La geomorfología de la zona está generalmente dominada por sistemas de canal-dique con canales meándricos que presentan direcciones de flujo SE-NW y S-N, extensiones de hasta 20 km y anchos menores a 2.2 km. Se evidencian algunas terrazas submarinas con extensiones de 10 km, al igual que algunas cicatrices de deslizamientos en algunos laterales de los diques. De igual forma se presentan registros de eventos erosivos que implican la desaparición de tramos de los diques y canales, pero aun así es posible identificar remanentes de estos en zonas exactas del fondo marino.

Se reconocieron 3 facies distintas en las líneas sísmicas relacionadas a diferentes depósitos sedimentarios. Estas facies difieren en espesores, amplitudes de los reflectores y continuidad de estos. Las facies que representan material no consolidado y depósitos de deslizamiento reflejan que la zona está siendo influenciada por el abanico del Magdalena y que a su vez ha sufrido de eventos de deslizamiento. Por otro lado, las capas de sedimentos en el subfondo se ven deformadas por un basamento que presenta 5 diapiros de lodo, con alturas bajas y medias y que son generados por sobrepresión de las rocas suprayacentes además de la baja densidad del material.



La zona no es estructuralmente controlada por fallas con extensiones profundas, sino por fallas normales que usualmente interceptan con el fondo marino. Estos sets de fallas normales pueden ser cartografiables y se encuentran en pocas zonas del volumen sísmico, ya que la mayoría están ubicadas al NW y E.

Gracias a los datos de rasgos geomorfológicos y geológicos se identificaron 4 zonas propensas a deslizamientos con una zona de influencia de 1,5 km por fallas cartografiadas y pendientes con grados de moderados a altos ( $16^{\circ}$ - $39^{\circ}$ ). Estas zonas permiten establecer lugares de medio y alto riesgo que se deberían tener en cuenta para los proyectos de exploración, explotación y para planes costeros y marítimos.

Por último, es posible estimar que el área de estudio es susceptible a eventos de deslizamiento, sin embargo, el mapa de geoamenazas corresponde a un resultado preliminar de zonas susceptibles. Se resalta que, para la generación de mapas con más información sobre zonas en posible riesgo, se deberían tener en cuenta muchos más factores desencadenantes.

## **8.2 Recomendaciones**

- Utilizar una batimetría multihaz que permita reconocer visualmente más geoformas o rasgos geomorfológicos.
- Interpretar líneas sísmicas con mayor calidad a menor escala para identificar mejor los depósitos sedimentarios recientes.
- Caracterizar y hacer un estudio detallado de los demás depósitos sedimentarios, que podrían dar indicios de eventos de deslizamiento o presentar algunos paleocanales.
- Utilizar well tops para reconocer edades del resto de las capas presentes en el subfondo y así recrear una posible secuencia que permita conocer mejor la evolución del volumen sísmico.

- Agregar más factores para generar mapas de susceptibilidad por deslizamientos con mayor detallados.

## Referencias

- Alfaro, E. y Holz, M. (2014) Stratigraphic relationships between the Colombian, Sinú Offshore and Sinú-San Jacinto basins based on seismic stratigraphy. *Brazilian Journal of Geology*, 44(4): p. 607-625. Doi: 10.5327/Z23174889201400040007.
- Ayalew, L. & Yamagishi, H. (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan, *Geomorphology*, Volume 65, Issues 1–2, p. 15-31. Doi: 10.1016/j.geomorph.2004.06.010.
- Bardet, J., Synolakis, E., Davies, F., Imamura y Okal, A. (2003) Landslide tsunamis: Recent Findings and research directions. *Pure appl. geophys.* 160 (2003). Doi: 10.1007/s00024-003-2406-0.
- Borrell, N., Somoza, L., León, R., Medialdea, T., González, F., y Gimenez, J. (2016). GIS Catalogue of Submarine Landslides in the Spanish Continental Shelf: Potential and Difficulties for Susceptibility Assessment. In: Lamarche, g., Mountjoy, j. Et al. (eds) *Submarine Mass Movement and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 41, p. 499–508. Doi: 10.1007/978-3-319-20979-1\_50.
- Breen, N., (1989), Structural effect of Magdalena Fan deposition on the northern Colombia convergent margin: *Geology*, 17, p.34–37, Doi: 10.1130/0091-7613(1989).
- Cadena, A.F. y Slatt, R.M., (2013) Seismic and sequence stratigraphic interpretation of the area of influence of the Magdalena submarine fan, offshore northern Colombia. *Interpretation* 1 (1), SA53–SA74. Doi: 10.1190/INT-2013-0028.1.

Duque-Caro, H., (1984), Structural style, diapirism and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland: Geological Society of America Memoir 164, p. 303–316.

Duque-Caro, H. (1990). Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama Seaway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77(3-4), p. 203-234. Doi: 10.1016/0031-0182(90)90178-A.

Flinch, J. F., J. Amaral, A. Doucet, B. Mouly, C. Osorio, y J. M. Pince. (2003) Onshore–Offshore Structure of the Northern Colombia Accretionary Complex: Memory AAPG International Conference.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia, EE. UU.: Sistema Geológico de los EUA.

Idárraga-García, J., Masson, D. G., García, J., León, H., & Vargas, C. A. (2019) Architecture and development of the Magdalena Submarine Fan (southwestern Caribbean), *Marine Geology*, Volume 414, 2019, p. 18-33, ISSN 0025-3227. Doi: 10.1016/j.margeo.2019.05.005.

Jansen, E., Befring, T., Hans, E., Hans, H., y Sejrup, P. (1987) Large submarine slides on the Norwegian continental margin: Sediments, transport and timing, *Marine Geology*, Volume 78, Issues 1–2, 1987, p. 77-107, ISSN 0025-3227, Doi: 10.1016/0025-3227(87)90069-7.

Kellogg, J., Toto, E. y Ceron, J. (2005), Structure and tectonics of the Sinu-San Jacinto accretionary prism in northern Colombia. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.

- León, R & Somoza, L. (2011). GIS-based mapping for marine geohazards in seabed fluid leakage areas (Gulf of Cadiz, Spain). *Marine Geophysical Research*. 32. p. 207-223. Doi: 10.1007/s11001-011-9135-z.
- Mantilla-Pimiento, A. M., Jentzsch, G., Kley, J., & Alfonso-Pava, C. (2009). Configuration of the Colombian Caribbean margin: Constraints from 2D seismic reflection data and potential fields interpretation. In *Subduction zone geodynamics*. p. 247-272. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-540-87974-9\_13.
- Masse, P. (1977). L'argilocinese: type de deformation synsedimentaire des bassins de depot. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration - Production Elf Aquitaine*, Vol. 1, No. 1, p. 189-190.
- Montes, C., Rodríguez-Corcho, A. F., Bayona, G., Hoyos, N., Zapata, S., & Cardona, A. (2019). GPlates dataset for the tectonic reconstruction of the Northern Andes-Caribbean Margin. *Data in brief*, 25, 104398. Doi: 10.1016/j.dib.2019.104398.
- Morales, O y Rodríguez, A. (2005) Estudio Experimental Sobre Diapirismo De Lodo:" Relación Entre La Materia Orgánica Presente En El Lodo Y La Altura De Los Domos Diapíricos". Doctoral dissertation, Universidad Industrial de Santander, Escuela De Geología.
- Porras A. y Ortiz J.L. (2009) Estratigrafía secuencial para el Neógeno Superior en el suroeste offshore del Caribe colombiano. In *10th Simposio Bolivariano-Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas*.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2004). The Pacific and Caribbean rivers of Colombia: water discharge, sediment transport and dissolved loads. In *Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments*. p. 169-187. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi: 10.1007/978-3-662-07060-4\_14.

- Romero-Otero, G. (2009), Deepwater sedimentary processes in an active margin, Magdalena Submarine Fan, Offshore Colombia: Ph.D. thesis, University of Oklahoma.
- Romero-Otero, G. A., Slatt, R. M., & Pirmez, C. (2015). Evolution of the Magdalena deepwater fan in a tectonically active setting, offshore Colombia. C. Bartolini and P. Mann, eds., Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin: AAPG Memoir 108, p. 675–708. Doi: 10.1306/13531953M1083656
- Sarmiento-Orjuela, A. M. (2019). Stratigraphic Analysis of the Bahia Intraslope Basin, Offshore Northern Colombia. [TESIS].
- Urlaub, M., Talling, P. J., Zervos, A., and Masson, D. (2015) What causes large submarine landslides on low gradient ( $<2^\circ$ ) continental slopes with slow ( $\sim 0.15$  m/kyr) sediment accumulation? J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, p. 6722– 6739, Doi: 10.1002/2015JB012347.
- Vinnels, J. S., Butler, R. W., McCaffrey, W. D., & Paton, D. A. (2010). Depositional processes across the Sinú accretionary prism, offshore Colombia. Marine and Petroleum Geology, 27(4), p. 794-809. Doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.12.008